

ไบโอดีเซลจากใบและยอดอ้อยที่ได้จากกระบวนการ
ไพโรไลซิสแบบเร็วเชิงเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบฟอง
**Bio-oil from Catalytic Fast Pyrolysis of
Sugarcane Leaves and Tops in a Bubbling Fluidised Bed Reactor**

มนตรี วงศ์ศิริวิทยา อติศักดิ์ ปัตติยะ*

หน่วยปฏิบัติการวิจัยพลังงานชีวภาพและทรัพยากรหมุนเวียน คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม รหัสไปรษณีย์ 44150

*Corresponding author: Email: adisak_pattiya@yahoo.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการผลิตไบโอดีเซลที่ได้จากใบและยอดอ้อยในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบฟอง เมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าปริมาณผลได้ไบโอดีเซลรวมสูงสุดร้อยละ 62 ได้แก่ ไบโอดีเซลหนักร้อยละ 42 และไบโอดีเซลเบาร้อยละ 20 โดยน้ำหนักชีวมวล ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งมีปริมาณผลได้เชิงพลังงานร้อยละ 47 การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 มีผลดีต่อค่าความร้อนของไบโอดีเซล โดยค่าความร้อนสูงของไบโอดีเซลหนักมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 18 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เป็น 20 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ และเป็น 22 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลิน ซึ่งโดโลไมต์ให้ผลดีที่อุณหภูมิเร่งปฏิกิริยาที่ 500 ถึง 550 องศาเซลเซียส ขณะที่ดินขาวเคโอลินเหมาะสำหรับการใช้งานที่ 450 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเหล่านี้ทำให้ได้ปริมาณผลได้เชิงพลังงานของไบโอดีเซลประมาณร้อยละ 30

คำสำคัญ: ใบและยอดอ้อย โดโลไมต์ ดินขาวเคโอลิน ตัวเร่งปฏิกิริยา ไพโรไลซิสแบบเร็ว

ABSTRACT

In this paper, catalytic fast pyrolysis of sugarcane leaves and tops was carried out in a bubbling fluidised bed reactor for bio-oil production with an aim to investigate the effects of the natural catalysts, namely dolomite and kaolin, on mass and energy yields of the pyrolysis products as well as bio-oil properties. The results showed that without the catalyst, the sugarcane leaves and tops gave a maximum total bio-oil yield of 62 %, corresponding to 42 % heavy bio-oil and 20 % light bio-oil, at the pyrolysis temperature of 500 °C. At this temperature, the bio-oil energy yield was 47 % . The use of both catalysts had a positive impact on bio-oil heating value. The higher heating value (HHV) of the heavy bio-oil was increased from 18 MJ/kg for non-catalytic bio-oil to 20 MJ/kg for dolomite-catalysed bio-oil and to 22 MJ/kg for kaolin-catalysed bio-oil. Dolomite was shown to perform better at 500-550 °C, whereas 450 °C appeared to be more appropriate for kaolin as these catalyst temperatures gave maximum bio-oil energy yields of around 30 %.

Keywords: Sugarcane Leaves and Tops, Dolomite, Kaolin, Catalyst, Fast Pyrolysis

1. บทนำ

ชีวมวล (Biomass) คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติ และสามารถนำมาแปลงสภาพเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานทดแทนได้ ซึ่งเป็นการสร้างรายได้ให้กับคนในท้องถิ่น [1] เนื่องจากมีขั้นตอนของการปลูกทดแทนทำให้เกิดการจ้างงาน อีกทั้งวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมีราคาสูงขึ้นทำให้ได้กำไรจากการเพาะปลูกที่มากขึ้น การใช้ชีวมวลในลักษณะนี้ทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เกิดการหมุนเวียนและไม่มีการปล่อยเพิ่ม ชีวมวลจากส่วนของเกษตรกรรม ได้แก่ ใบและยอดอ้อย เศษไม้ ฟางข้าว เถ่าสำปะหลัง เปลือกถั่วลิสง ชังข้าวโพด และกะลามะพร้าว ชีวมวลเหล่านี้เป็นวัสดุเหลือใช้และเกิดปัญหาด้านการจัดเก็บไปจนถึงการเผาหรือกำจัดทิ้ง ใบและยอดอ้อยจัดว่าเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มีจำนวนมาก จากข้อมูลการปลูกอ้อยของประเทศไทยพบว่ามีประมาณ 20 ล้านตันต่อปี (กลุ่มวิชาการสารสนเทศ อุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล, 2558/2559) ซึ่งการเก็บเกี่ยวอ้อยมีขั้นตอนในการแยกเอาเฉพาะต้นอ้อยเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำตาลของโรงงานอุตสาหกรรม และเหลือเศษวัสดุที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์ คือใบและยอดอ้อย ซึ่งมีวิธีการกำจัดโดยการเผาทิ้งทำให้เกิดปัญหาหมอกพิษและทำลายชั้นบรรยากาศ [2] จากปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการนำใบและยอดอ้อยมาแปลงสภาพเป็นพลังงานด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว ซึ่งสามารถเปลี่ยนใบและยอดอ้อยเป็นพลังงานที่อยู่ในรูปของเหลว ของแข็ง และแก๊สได้ [3]

การไพโรไลซิสแบบเร็วเป็นกระบวนการทางความร้อนในสภาวะปราศจากออกซิเจนที่สามารถเปลี่ยนวัตถุดิบของแข็งให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวที่เรียกว่า “ไบโอออยล์ (Bio-oil)” ของแข็งที่เรียกว่า ถ่านชาร์ (Char) และแก๊ส (Gas) จึงเหมาะที่จะนำมาใช้ย่อยสลายเศษวัสดุเหลือใช้แทนการเผาทิ้ง จากงานวิจัยที่ผ่านมาการไพโรไลซิสแบบเร็วสามารถผลิตไบโอออยล์ได้ถึงร้อยละ 80 โดยน้ำหนักชีวมวล [4] ไบโอออยล์มีสมบัติทั่วไปเทียบเท่าน้ำมันเตา และสามารถนำมาผลิตไฟฟ้าพลังงานความร้อนได้ [5] ในปัจจุบันได้มีการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์หลายชนิด

ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating fluidised bed reactor) ซึ่งมีลักษณะการทำงานของทรายแบบหมุนเวียนในระบบ และปล่อยอากาศเข้าเล็กน้อยเข้าไปเผาไหม้ทำให้เม็ดทรายสะอาด [6] เครื่องปฏิกรณ์ตกอิสระ (Free-fall reactor) ซึ่งมีลักษณะการทำงานแบบปล่อยให้ชีวมวลไหลตกแบบอิสระและเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกับเครื่องปฏิกรณ์ช่วงระหว่างการเคลื่อนที่ของชีวมวล [7] เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเวฟ (Microwave reactor) ซึ่งมีลักษณะการแผ่รังสีคลื่นสั้นรูปแบบหนึ่งที่ทำให้พื้นที่ตกกระทบของคลื่นเกิดความร้อนเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับชีวมวล [8] เครื่องปฏิกรณ์กรวยหมุน (Rotating cone) ซึ่งมีลักษณะการทำงานด้วยการปล่อยให้ชีวมวลไหลเข้าสู่กรวย ซึ่งกรวยทำงานโดยการหมุนเพื่อเหวี่ยงทรายที่ความร้อนเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับชีวมวล [9] และเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟอง (Bubbling fluidised bed reactor) ซึ่งมีลักษณะการทำงานโดยใช้ทรายเป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อนกับชีวมวลโดยตรง และใช้ในโตรเจนในการทำให้ทรายเกิดการยกตัวแบบฟอง เพื่อให้การแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีขึ้น [10]

การทดลองกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วนิยมใช้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟอง เพราะมีระบบถ่ายโอนความร้อนที่ดี และมีขั้นตอนการดำเนินการไม่ยุ่งยาก ทำให้สามารถขยายกำลังการผลิตเป็นระดับอุตสาหกรรมได้ งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟองในการผลิตไบโอออยล์ และยังมีพัฒนาคุณภาพของไบโอออยล์ให้มีสมบัติที่ดีขึ้นโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการ เนื่องจากสมบัติของไบโอออยล์บางประการที่สามารถแก้ไขได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาปรับปรุงให้ปริมาณออกซิเจนในไบโอออยล์ลดลง [11] ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความร้อนที่สูงขึ้น

ในการไพโรไลซิสแบบเร็ว ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันมากคือ ZSM-5 ซึ่งสามารถช่วยลดปริมาณออกซิเจนในไบโอออยล์ได้ [11, 12] โดยเพิ่มสัดส่วนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน แต่ส่งผลให้ปริมาณไบโอออยล์ลดลงและแก๊สเพิ่มขึ้น [13, 14] ตัวเร่งปฏิกิริยา

ZSM-5 เป็นตัวเร่งที่สังเคราะห์ขึ้นมา ซึ่งมีขายในท้องตลาดและอยู่ในเกรดตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมที่มีราคาค่อนข้างสูง [15] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาทดแทนชนิดอื่นที่สามารถหาได้ในประเทศไทย ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาโตไลไมท์ และดินขาวเคโอลิน โดยนำมากระตุ้นก่อนใช้งาน และทดสอบศักยภาพในการเร่งปฏิกิริยาเพื่อปรับปรุงสมบัติของไบโอเอทิล [16, 17] โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าความร้อนสูง โดยนำมาทดสอบในเครื่องปฏิกรณ์เร่งปฏิกิริยาที่ติดตั้งพร้อมกับเครื่องไพโรไลซิสแบบเร็วชนิดฟลูอิดซ์เบดแบบฟองและทดสอบโดยใช้ไบและยอดอ้อย ผลที่ได้นำมาเทียบกับการทดลองแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อศึกษาปริมาณผลได้เชิงมวล (Mass yield) และเชิงพลังงาน (Energy yield) ซึ่งสมบัติของไบโอเอทิลที่ได้จะอยู่ในรูปของปริมาณน้ำ ความหนืด ความหนาแน่น จุดวาบไฟ จุดติดไฟ และค่าความร้อนสูง

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัตถุประสงค์ชีวมวล

ตารางที่ 1 แสดงสมบัติของชีวมวลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ไบและยอดอ้อย โดยเริ่มต้นจากการเข้าเครื่องบดย่อย และคัดแยกขนาดให้ได้อนุภาค 0.2 ถึง 0.6 มิลลิเมตร จากนั้นนำตัวอย่างชีวมวลวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) เพื่อหาปริมาณน้ำด้วยวิธีการ NREL/TP-510-42621 จากนั้นนำชีวมวลเข้า

ตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และหาปริมาณสารระเหยด้วยมาตรฐาน ASTM-E872-82 โดยนำตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งจากการหาปริมาณน้ำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที และหาปริมาณเถ้าด้วยวิธีการ NREL/TP-510-42622 โดยนำชีวมวลตัวอย่างมาเผาที่อุณหภูมิ 575 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [18]

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) โดยวิธี ASTM D5291 เพื่อหาสัดส่วนของธาตุหลัก ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน [19] แสดงข้อมูลสมบัติของชีวมวลของไบและยอดอ้อยในตารางที่ 1 เมื่อเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

การวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อนสูง โดยใช้เครื่องบอมม์แคลอริมิเตอร์ (Bomb calorimeter) ยี่ห้อ ESSOM รุ่น Art 2060/2070 ตามมาตรฐาน DIN 51900 เริ่มต้นซึ่งน้ำหนักตัวอย่างชีวมวลหนักประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยเผาไหม้ โดยนำถ้วยเผาไหม้ใส่ลงในลูกบอมม์แล้วบรรจุออกซิเจน จากนั้นประกอบเข้ากับเครื่อง และปล่อยกระแสไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านเส้นลวดเพื่อให้เกิดการจุดระเบิด ซึ่งความร้อนจากการเผาไหม้จะถูกถ่ายเทไปยังน้ำที่บอมม์ แช่ไว้ จะได้อุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบผลต่างของอุณหภูมิกับสารมาตรฐาน ทำให้ทราบปริมาณค่าความร้อนจากการเผาไหม้ซึ่งเป็นค่าความร้อนสูง ขณะที่ค่าความร้อนต่ำคำนวณจากค่าความร้อนสูงและปริมาณไฮโดรเจน ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติของไบและยอดอ้อย

วิเคราะห์	งานวิจัย		[10]		[7]	
	ไบและยอดอ้อย	ไบอ้อย	ยอดอ้อย	ไบอ้อย	ยอดอ้อย	
การวิเคราะห์แบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, ฐานเปียก)						
ความชื้น	4.9	3.3	2.7	6.7	6.6	
สารระเหย	73.2	74.4	76.3	79.0	74.9	
คาร์บอนคงที่	14.8	15.1	14.4	8.6	12.5	
เถ้า	7.1	7.2	6.6	5.7	6.0	

ตารางที่ 1 (ต่อ)

วิเคราะห์	งานวิจัย [10]			[7]	
	ใบและยอดอ้อย	ใบอ้อย	ยอดอ้อย	ใบอ้อย	ยอดอ้อย
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, ปราศจากเถ้า)					
คาร์บอน	44.3	50.8	48.7	48.9	49.0
ไฮโดรเจน	7.2	5.2	4.9	6.5	6.6
ไนโตรเจน	1.2	0.4	0.6	0.2	0.6
ออกซิเจน	47.3	43.6	45.8	44.4	43.8
ค่าพลังงานความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)					
ค่าความร้อนสูง	16.2	17.8	17.2	18.4	18.3
ค่าความร้อนต่ำ	14.7	16.8	16.2	17.0	17.0

2.2. อุปกรณ์ไพโรไลซิสแบบเร็ว

การไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบพอง โดยมีอุปกรณ์ต่าง ๆ แสดงรูปที่ 1 ประกอบด้วย ถังป้อนชีวมวล (Biomass hopper) เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบพอง (Fast pyrolysis reactor) ชุดไซโคลนและถังเก็บชาร์ (Cyclone and char pot) เครื่องปฏิกรณ์เร่งปฏิกิริยา (Catalytic reactor) ชุดควบแน่นด้วยน้ำ (Condenser) ซึ่งประกอบด้วยชุดตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) และชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมเอซีโตน (Dry-ice/acetone condenser) จำนวน 2 ชุด

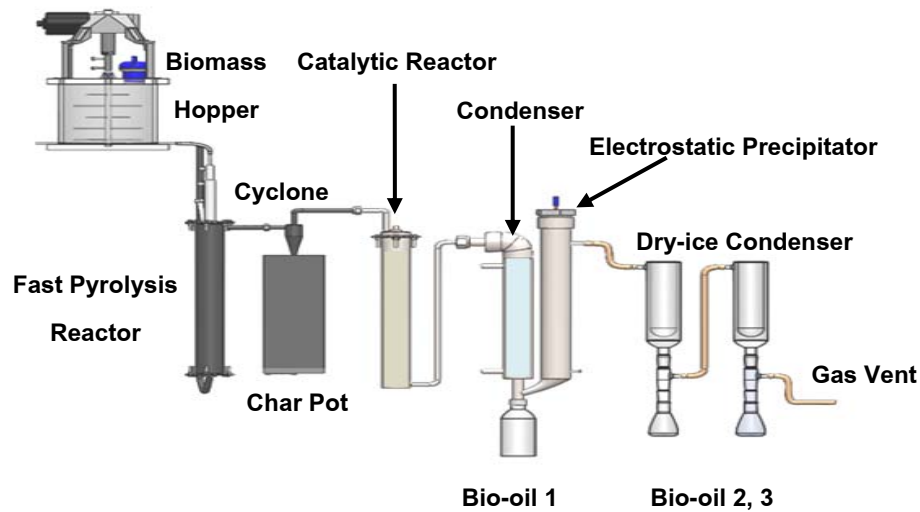
2.3. ตัวเร่งปฏิกิริยา

งานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิด ได้แก่ โดโลไมต์ (Dolomite) และดินขาวเคโอลิน (Kaolin) โดยโดโลไมต์เป็นหินตะกอนประกอบด้วยแคลเซียม แมกนีเซียม คาร์บอเนต ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM-EDX พบว่ามีส่วนประกอบของแคลเซียมเท่ากับร้อยละ 35.5 แมกนีเซียมเท่ากับร้อยละ 8.8 ซิลิคอนเท่ากับร้อยละ 3.1 และออกซิเจนเท่ากับร้อยละ 52.6 และมีลักษณะคล้ายกับหินปูน และมีแหล่งกำเนิดอยู่บริเวณอำเภอเมืองและอำเภอกำแพง จังหวัดกาญจนบุรี โดยโดโลไมต์จะสามารถทนความร้อนได้สูง ส่วนการนำไปใช้จะมีขั้นตอนของการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา โดยนำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 900 ใช้ระยะเวลา 4 ชั่วโมง [20, 21]

ดินขาวเคโอลินเป็นดินขาวที่เกิดจากการแปรสภาพของหินแกรนิต มีสูตรเคมี $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})$ จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM-EDX พบว่ามีส่วนประกอบของเหล็กเท่ากับร้อยละ 7.7 อะลูมิเนียมเท่ากับร้อยละ 5.1 ซิลิคอนเท่ากับร้อยละ 32.4 และออกซิเจนเท่ากับร้อยละ 54.8 ซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงและเป็นเนื้อดินหยาบ สีขาวหม่น มีความ หดตัวน้อย และสามารถทนความร้อนได้ถึง 1,500 องศาเซลเซียส และมีขั้นตอนของการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อใช้งาน โดยการนำไปเผาที่ 800 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลา 6 ชั่วโมง [22, 23] ตัวเร่งปฏิกิริยานี้สามารถพบได้จากบริเวณเขตติดต่อระหว่างจังหวัดตากและจังหวัดลำปาง

2.4. การไพโรไลซิสแบบเร็ว

การไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบพอง เริ่มต้นตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ โดยกำหนดช่วงการศึกษาที่อุณหภูมิ 450 500 และ 550 องศาเซลเซียส แก๊สไนโตรเจนใช้สำหรับพาชีวมวลเข้าเครื่องปฏิกรณ์มีอัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที และใช้สำหรับการฟลูอิดไคซ์ที่อัตรา 6 ลิตรต่อนาที หลังจากให้อุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ที่ 1 ได้ค่าความร้อนที่กำหนดไว้จึงทำการป้อนชีวมวลเข้าไปทำการแลกเปลี่ยนความร้อนกับเม็ดทรายที่ร้อนวิ่งกระทบกันแล้วเกิดเป็นไอไพโรไลซิสและถ่านชาร์ [24] จากนั้นไอไพโรไลซิสไหลเข้าสู่ไซโคลนเพื่อเหวี่ยงแยกถ่านชาร์กับไอไพโรไลซิสออกจากกันให้มากที่สุด และถ่านชาร์จะตกไปอยู่โรไลซิส



รูปที่ 1 อุปกรณ์การไพโรไลซิสแบบเร็ว

จะไหลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เร่งปฏิกิริยา (Catalytic reactor) ซึ่งทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาโดยตรงกับไฮไพโรไลซิส โดยมีการศึกษาอุณหภูมิของตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์และดินขาวเคโอลินที่ 450 500 และ 550 องศาเซลเซียส จากนั้นไฮไพโรไลซิสไหลเข้าสู่ชุดควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นที่อุณหภูมิประมาณ 35 องศาเซลเซียส เพื่อลดอุณหภูมิของไฮไพโรไลซิสอย่างรวดเร็ว [4] และบางส่วนเกิดการควบแน่นเป็นไบโอออยล์ ส่วนไฮไพโรไลซิสที่เหลือไหลเข้าสู่ชุดตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสถิต โดยวิธีการปล่อยกระแสไฟฟ้าแรงดันสูงประมาณ 18 กิโลโวลต์ เพื่อควบแน่นเป็นไบโอออยล์หนัก แต่ยังมีไฮไพโรไลซิสบางส่วนที่ไม่สามารถควบแน่นด้วยไฟฟ้าสถิตจะไหลผ่านมายังชุดควบแน่นน้ำแข็งแห้งผสมแอสีโทนที่อุณหภูมิต่ำประมาณ -75 องศาเซลเซียส โดยการทำให้ควบแน่นเป็นไบโอออยล์เบา ส่วนที่เหลือคือแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ (Non-condensable gas) หรือแก๊สถาวร (Permanent gas)

2.5. การทำสมดุลมวล

ผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสแบบเร็ว ประกอบด้วย ไบโอออยล์ ถ่านชาร์ และแก๊ส ซึ่งปริมาณผลได้เชิงมวลสามารถคำนวณได้โดยการชั่งน้ำหนักของทุกส่วนได้แก่ ชีวมวล เครื่องปฏิกรณ์ ไฮโคลนและถังเก็บชาร์ ชุดควบแน่นด้วยน้ำและไฟฟ้าสถิต และชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมแอสีโทน ทั้งก่อนและ

หลังการทดลอง ปริมาณผลได้เชิงมวลสามารถแบ่งได้เป็น 5 ส่วน ได้แก่ ไบโอออยล์รวม ไบโอออยล์หนัก ไบโอออยล์เบา ถ่านชาร์ และแก๊ส

ไบโอออยล์รวมหาได้จากผลต่างของน้ำหนักของชุดควบแน่นทั้งหมดและขวดเก็บไบโอออยล์ โดยไบโอออยล์หนักได้จากส่วนชุดควบแน่นด้วยน้ำและชุดตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสถิต ส่วนไบโอออยล์เบาได้จากชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมแอสีโทน ถ่านชาร์ได้จากผลต่างของน้ำหนักของชุดเครื่องปฏิกรณ์และชุดดักจับถ่านชาร์ ขณะที่ปริมาณผลได้ของแก๊สคำนวณได้จากค่าความแตกต่างของปริมาณผลได้โดยรวม

ปริมาณผลได้เชิงพลังงานสามารถหาได้โดยการนำเอาค่าปริมาณผลได้เชิงมวล และค่าความร้อนสูงของไบโอออยล์และถ่านชาร์ที่ได้จากการวัดค่าโดยเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ แล้วนำค่ามาคำนวณร่วมกัน และแสดงออกมาในรูปแบบร้อยละเปรียบเทียบกับปริมาณผลได้เชิงมวลของไบโอออยล์รวม

2.6. การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพ

2.6.1 ปริมาณน้ำ (Water content)

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำในไบโอออยล์สามารถทำได้โดยใช้วิธีการไทเทรตของคาลฟิชเชอร์ (Karl Fisher Titration) ด้วยการใช้อุปกรณ์มาตรฐานยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น V20 สารที่ใช้เป็นตัวทำ

ปฏิกิริยา Hydranal Composite 5 และ Hydranal Medium K ยี่ห้อ Fluka Analytical การทดสอบแต่ละตัวอย่างทำ 3 ซ้ำ

2.6.2 ความหนืดของไบโอออยล์ (Viscosity)

การวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือทดสอบความหนืด ยี่ห้อ Cannon-Fenske Routine 9721-B77 Size 350 ตามมาตรฐานของ ASTM D445 ทำการทดสอบที่ 40 องศาเซลเซียส และจับเวลาการไหลของไบโอออยล์ภายในหลอดแก้ว แล้วนำหน่วยที่วัดได้เป็นวินาทีมาคูณกับค่าคงที่ของหลอด (Factor 350 = 2.433 cSt/s) จะได้ค่าความหนืดของไบโอออยล์มีหน่วยวัดเป็นเซนติสโตกส์

2.6.3 ความหนาแน่น (Density)

การวิเคราะห์ความหนาแน่นเริ่มจากการชั่งน้ำหนักของไบโอออยล์ต่อหน่วยปริมาตรเป็นกรัมต่อมิลลิลิตร โดยการเติมไบโอออยล์ลงในขวดวัดความหนาแน่นขนาด 20 มิลลิลิตร จากนั้นนำมาชั่งเพื่อหาน้ำหนักที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส [25] เสร็จแล้วเทียบหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิลิตร

2.6.4 จุดวาบไฟ และจุดติดไฟ

การทดสอบให้ความร้อนกับไบโอออยล์ของเครื่องวัดจุดวาบไฟและจุดติดไฟ เริ่มต้นโดยการเทตัวอย่างไบโอออยล์ลงในถ้วยทดลองประมาณ 5 กรัม และวางถ้วยในตำแหน่งที่ให้ความร้อนของเครื่อง แล้วใช้เทอร์โมคัปเปิลจุ่มลงในไบโอออยล์ที่อยู่ในถ้วยทดลอง จากนั้นใช้แก๊สจุดเปลวไฟทดสอบ โดยให้เปลวไฟผ่านไปมาประมาณ 1 วินาที และบันทึกค่าอุณหภูมิเทียบกับเวลาที่ใช้ และทำอย่างนี้ไปจนกว่าจะถึงจุดวาบไฟ ส่วนจุดติดไฟก็ทำการทดลองเช่นเดียวกับจุดวาบไฟ แต่ต้องทำไปจนกว่าจะเกิดการติดไฟ ซึ่งต้องเป็นการลุกไหม้ต่อเนื่องกันประมาณ 10 วินาที

2.6.4 ค่าความร้อนสูง (Heating value)

การวิเคราะห์หาค่าความร้อนสูง โดยใช้เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ยี่ห้อ ESSOM รุ่น Art 2060/2070 เริ่มต้นการวัดค่าของเบนโซอิกใช้เป็นสารมาตรฐานการทดสอบ จากนั้นใช้ไบโอออยล์ประมาณ 1 กรัมต่อการทดลอง ซึ่งการทดลองแสดงผลออกเป็นค่าพลังงานความร้อน และมีหน่วยเป็นเมกะจูลต่อกิโลกรัม

3. ผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ทำการผลิตไบโอออยล์จากไบและยอดอ้อยโดยการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟอง จากการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

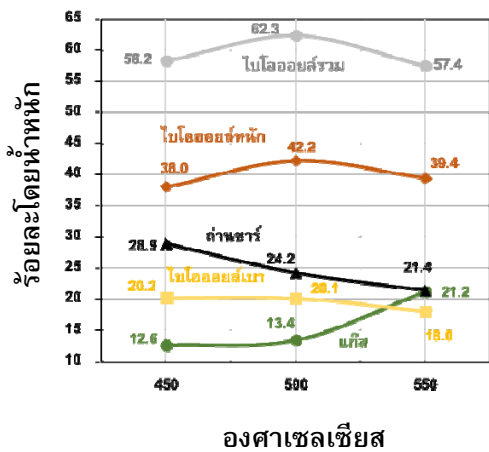
3.1 การไพโรไลซิสแบบเร็วเมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

การไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟองเมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อศึกษาอุณหภูมิไพโรไลซิสแบบเร็วที่มีผลต่อปริมาณผลได้เชิงมวล ปริมาณผลได้เชิงพลังงาน สมบัติของไบโอออยล์หนักและค่าความร้อนสูง

ไบโอออยล์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ไบโอออยล์หนักและไบโอออยล์เบา ซึ่งไบโอออยล์หนัก คือ ไบโอออยล์ที่ควบแน่นด้วยชุดหล่อเย็นด้วยน้ำและชุดตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสถิต เป็นไบโอออยล์ที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ [4] ส่วนไบโอออยล์เบา คือไบโอออยล์ที่ได้จากชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมแอสซิโตน ซึ่งไม่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ เนื่องจากประกอบด้วยน้ำเป็นส่วนใหญ่ แต่สามารถนำไปใช้ในลักษณะเดียวกันกับน้ำส้มควันไม้ โดยการใช้เป็นสารกำจัดแมลง ซึ่งผลทั้ง 2 ส่วนนี้ได้ออกมาเป็นไบโอออยล์รวม และมีสิ่งที่แตกต่างกันก็คือจุดเดือดเนื่องจากการควบแน่นใช้อุณหภูมิแตกต่างกัน

ปริมาณผลได้เชิงมวลที่อุณหภูมิ 450 500 และ 550 องศาเซลเซียส เมื่อใช้นาฬิกาของทรายและชีวมวลระหว่าง 0.2 ถึง 0.6 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 2 ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวมจากไบและยอดอ้อยเป็นร้อยละ 58.2 62.3 และ 57.4 โดยน้ำหนักชีวมวล ซึ่งเห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 450 เป็น 500 องศาเซลเซียส ปริมาณไบโอออยล์รวมจากร้อยละ 58.2 เพิ่มขึ้นเป็น 62.3 โดยน้ำหนักชีวมวล และทราบว่างานวิจัยที่ผ่านมาใช้ไบอ้อยในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟองที่อุณหภูมิ 403 องศาเซลเซียส มีปริมาณผลได้เชิงมวลร้อยละ 59.0 [10] และในเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระที่อุณหภูมิ 400 มีปริมาณผลได้เชิงมวลเป็นร้อยละ 53.3 โดยน้ำหนักชีวมวล [7] ซึ่งงานวิจัยนี้

มีปริมาณผลได้เชิงมวลมากกว่าถึงร้อยละ 4 ถึง 7 โดยน้ำหนักชีวมวล แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 550 องศาเซลเซียส ปริมาณผลได้เชิงมวลของไบโอดีเซลรวมจะลดลง และตรงกับงานวิจัยที่กล่าวไว้ว่าที่อุณหภูมิมากกว่า 500 องศาเซลเซียส มีผลต่อการแตกตัวรอบสองของไอไพโรไลซิสทำให้ปริมาณผลได้ลดลง [4] และตรงกับผลการทดลองว่าปริมาณผลได้เชิงมวลลดลงเมื่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นแสดงรูปที่ 2 ซึ่งมีแนวโน้มลักษณะเดียวกันกับไบโอดีเซลหนัก และไบโอดีเซลเบา มีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิจากร้อยละ 20.2 เป็นร้อยละ 18.0 โดยน้ำหนักชีวมวล



รูปที่ 2 ปริมาณผลได้เชิงมวลจากกระบวนการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการทดลองทราบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ให้ปริมาณผลได้ของไบโอดีเซลรวมสูงสุด คือ 500 องศาเซลเซียส ส่วนผลของอุณหภูมิต่อปริมาณผลได้ของถ่านชาร์ในช่วงอุณหภูมิ 450 ถึง 500 องศาเซลเซียส มีผลต่อการย่อยสลายตัวประมาณร้อยละ 5 แต่เมื่อเทียบจากอุณหภูมิ 500 ถึง 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ถ่านชาร์เกิดการสลายตัวเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 3 [26] ในลักษณะเดียวกันผลของอุณหภูมิต่อปริมาณของแก๊สในช่วงอุณหภูมิ 450 ถึง 500 องศาเซลเซียส มีผลน้อยมาก แต่ในขณะที่อุณหภูมิจาก 500 ถึง 550 องศาเซลเซียส ส่งผลให้เห็นชัดเจนว่าปริมาณแก๊สเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 13.4 เป็นร้อยละ 21.2 จากการพิจารณาเป็นการเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 8 จากข้อมูลดังกล่าวคาดว่าส่วนหนึ่งมาจากการลดลงของถ่านชาร์ร้อยละ 2 และอีกส่วนมาจากการลดลงของไบโอดีเซลรวม แสดงให้เห็นว่าเมื่อไพโรไลซิสแบบเร็วที่ 500 องศาเซลเซียส หรือ อุณหภูมิสูงกว่าส่งผลให้ชีวมวลและถ่านชาร์สลายตัวเพิ่มขึ้นกลายเป็นแก๊ส [27] และอีกส่วนหนึ่งของไอไพโรไลซิสสลายตัวเป็นแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้เช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้

ปริมาณผลได้เชิงพลังงานสามารถหาได้โดยการนำปริมาณผลได้เชิงมวลของไบโอดีเซลหนักไปคำนวณร่วมกับค่าความร้อนสูงของไบโอดีเซล และถ่านชาร์ จากนั้นแสดงค่าออกมาเป็นปริมาณผลได้เชิงพลังงานดังตารางที่ 2 ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ให้ปริมาณผลได้เชิงพลังงานส่วนที่เป็นไบโอดีเซลสูงถึงร้อยละ 46.8 ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณผลได้ในเชิงมวล แสดงว่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เหมาะสมต่อการนำมาใช้ผลิตไบโอดีเซลทั้งในเชิงมวล (Mass yield) และในเชิงค่าพลังงาน (Energy yield) และอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านชาร์เป็นร้อยละ 31.2 และปริมาณผลได้เชิงพลังงานของแก๊สเป็นร้อยละ 22.0 ซึ่งเห็นได้ว่าพลังงานของถ่านชาร์และแก๊สรวมกันสูงถึงร้อยละ 53.2 จึงเหมาะต่อการนำไปใช้เป็นพลังงาน โดยถ่านชาร์จะสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานความร้อนให้กับระบบ หรือ อัดแท่งนำไปใช้เป็นพลังงานความร้อน และแก๊สสามารถนำมาหมุนวนให้พลังงานความร้อนในการอบแห้งชีวมวล [24] หรือ ใช้ในการไล่ความชื้นของกระบวนการต่างๆ

ตารางที่ 2 ปริมาณผลได้เชิงพลังงานจากการไพโรไลซิสแบบเร็ว (ร้อยละ)

ผลิตภัณฑ์	อุณหภูมิไพโรไลซิสแบบเร็ว (องศาเซลเซียส)		
	450	500	550
	ไบโอดีเซล	41.9	46.8
ถ่านชาร์	37.3	31.2	27.6
แก๊ส	20.8	22.0	30.0

ตารางที่ 3 แสดงสมบัติของไบโอออยล์หนัก ซึ่งสามารถแบ่งออกได้แก่ ปริมาณน้ำ ความหนืด ความหนาแน่น จุดวาบไฟ จุดติดไฟและค่าความร้อนสูงเทียบได้ตามเกณฑ์มาตรฐานของ ASTM D7544-12 ซึ่งพบว่าปริมาณน้ำจากข้อกำหนดไม่เกินร้อยละ 30 [19, 24] ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ามีปริมาณน้ำในไบโอออยล์หนักในทุกอุณหภูมิผ่านเกณฑ์มาตรฐาน โดยมีปริมาณน้ำน้อยที่สุดเป็นร้อยละ 11.7 ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาในเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส มีปริมาณน้ำเป็นร้อยละ 18.1 และ 24.2 [7] ซึ่งมีค่าปริมาณน้ำที่มากกว่าค่าที่ได้จากงานวิจัยนี้ ส่วนค่าความหนืดของไบโอออยล์พบว่าอุณหภูมิไม่ส่งผลมากนัก และไบโอออยล์หนักมีค่าความหนืดประมาณ 33 เซนติสโตกส์ ซึ่งผ่านเกณฑ์ที่กำหนดต่ำกว่า 125

เซนติสโตกส์ [25] ส่วนค่าความหนาแน่นควรอยู่ในช่วง 1.1 ถึง 1.3 กรัมต่อมิลลิลิตร ผลการทดลองพบว่าอยู่ในช่วงมาตรฐานเป็น 1.1 กรัมต่อมิลลิลิตร [19, 25] แต่อยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำ ขณะที่จุดวาบไฟมีเกณฑ์กำหนดไว้ที่มากกว่า 45 องศาเซลเซียส [25] ซึ่งก็ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน ส่วนจุดติดไฟไม่ได้กำหนดในมาตรฐานแต่มีค่าสูงกว่าจุดวาบไฟประมาณ 10 องศาเซลเซียส และค่าความร้อนสูงของไบโอออยล์มีค่าอยู่ประมาณ 18.0 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ขณะที่งานวิจัยที่ผ่านมามีค่าความร้อนของไบโอออยล์จากการไพโรไลซิสแบบเร็วของไบออย และซังข้าวโพดเป็น 18.2 และ 18.8 เมกะจูลต่อกิโลกรัมตามลำดับ [11, 28] แสดงให้เห็นว่ามีค่าไม่ต่างกันมาก และปริมาณผลได้เชิงมวลจึงเป็นตัวกำหนดปริมาณผลได้เชิงพลังงาน

ตารางที่ 3 สมบัติของไบโอออยล์หนักจากการไพโรไลซิสแบบเร็ว

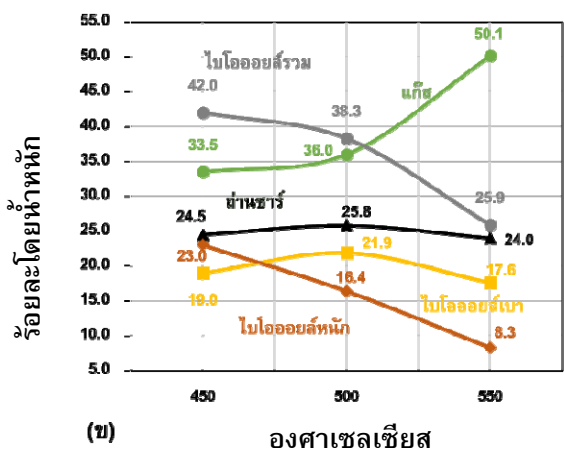
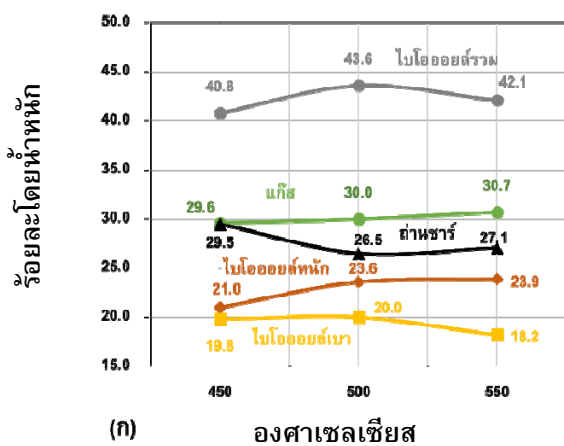
วิเคราะห์	การไพโรไลซิสแบบเร็ว (องศาเซลเซียส)			ASTM D7544-12
	450	500	550	
ปริมาณน้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	12.7±1.2	11.7±1.4	14.4±2.1	<30
ความหนืด (เซนติสโตกส์)	32.8±0.6	33.2±0.8	33.0±0.4	<125
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	1.1±0.1	1.1±0.03	1.1±0.1	1.1-1.3
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	140±2.1	135±1.4	130±3.8	>45
จุดติดไฟ (องศาเซลเซียส)	148±1.5	142±2.6	138±1.2	-
ค่าความร้อนสูง (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	17.8±0.6	18.0±0.8	17.4±1.1	>15

3.2 การไพโรไลซิสแบบเร็วเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
การศึกษาผลของชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิของการเร่งปฏิกิริยาในช่วง 400-550 องศาเซลเซียส ใช้อุณหภูมิไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบฟองคั้งที่ 500 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 3 (ก) จากรูปพบว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโตโลไมต์ในตำแหน่งเครื่องปฏิกรณ์เร่งปฏิกิริยา (Catalytic reactor) และเพิ่มอุณหภูมิของการเร่งปฏิกิริยาจาก 450 เป็น 500 องศาเซลเซียส ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวม

เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 40.8 เป็นร้อยละ 43.6 โดยน้ำหนักชีวมวล แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเร่งปฏิกิริยาเป็น 550 องศาเซลเซียส มีผลต่อปริมาณผลได้เชิงมวลของไบโอออยล์บาลดลงเล็กน้อย เนื่องจากเกิดการแตกตัวของไอไพโรไลซิสเป็นแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้มากขึ้น [4] ซึ่งตรงกับงานวิจัยที่ผ่านมาได้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโตโลไมต์ในเครื่องแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) เพื่อให้มีปริมาณแก๊สที่มากขึ้น [21] ซึ่งส่งผลโดยตรงกับปริมาณผลได้ของไบโอออยล์เนื่องจากการกลายเป็น

แก๊สที่มากขึ้น ส่วนถ่านซาร์ให้ผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ขณะที่การทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลิน ที่อุณหภูมิเร่งปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส ให้ปริมาณผลได้สูงสุดเป็นร้อยละ 42.0 โดยน้ำหนักชีวมวล และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเร่งปฏิกิริยาจาก 450 เป็น 500 องศาเซลเซียส แสดงรูปที่ 3 (ข) ซึ่งมีผลต่อปริมาณผลได้เชิงมวลของไบโอออยล์รวมจากร้อยละ 42.0 ลดลงเป็นร้อยละ 38.3 โดยน้ำหนักชีวมวล และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเร่งปฏิกิริยาเป็น 550 องศาเซลเซียส ปริมาณผลได้เชิงมวลของไบโอออยล์รวมลดลงเหลือแค่ร้อยละ 25.9 โดยน้ำหนักชีวมวล จากการทดลองทราบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินมีผล



รูปที่ 3 ปริมาณผลได้เชิงมวลจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (ก) โดโลไมต์ (ข) ดินขาวเคโอลิน

ต่อการแตกตัวของไฮโฟโรไลซิส [29] ซึ่งแสดงให้เห็นชัดเจนว่า ในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลิน อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลต่อปริมาณผลได้เชิงมวล และปริมาณผลได้เชิงมวลของไบโอออยล์หนักแปรผันตามปริมาณผลได้เชิงมวลของไบโอออยล์รวม ขณะที่ไบโอออยล์เบาลดลงถึงร้อยละ 4 ซึ่งเกิดจากการเพิ่มอุณหภูมิเร่งปฏิกิริยาสูงขึ้นทำให้มีผลต่อปริมาณแก๊สเพิ่มสูงถึงร้อยละ 15 ส่วนของถ่านซาร์เกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

จากผลการทดลอง พบว่าปริมาณไบโอออยล์รวมของการทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ ให้ปริมาณผลได้สูงที่สุดที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส แต่ในการทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินนั้น พบว่าปริมาณผลได้สูงสุดของไบโอออยล์รวมอยู่ที่ 450 องศาเซลเซียส และการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 500 และ 550 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ปริมาณไบโอออยล์รวมลดลงอย่างมาก แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินมีความไวเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการเร่งที่เพิ่มขึ้น ขณะที่โดโลไมต์ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเร่งปฏิกิริยาส่งผลเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากองค์ประกอบตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4 แสดงผลการคำนวณปริมาณผลได้เชิงพลังงานของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการ โดยคำนวณจากปริมาณผลได้โดยมวลและค่าความร้อนสูงของผลิตภัณฑ์ของเหลวและของแข็ง ขณะที่ค่าพลังงานของแก๊สคำนวณโดยความแตกต่าง ทั้งอุณหภูมิและชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลโดยตรงต่อปริมาณผลได้เชิงพลังงาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ส่งผลต่อปริมาณผลได้เชิงพลังงานที่อุณหภูมิเร่งปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส ได้เป็นร้อยละ 25.0 แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 500 และ 550 องศาเซลเซียส ปริมาณผลได้เชิงพลังงานเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 29.5 และ 29.8 หรือเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 5 ขณะที่ใช้ดินขาวเคโอลิน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเร่งปฏิกิริยาแล้วปริมาณผลได้เชิงพลังงานจะลดลง แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดให้ผลการทดลองที่ไม่เหมือนกัน จากข้อมูลในตารางที่ 4 เมื่อเทียบกับในตารางที่ 2 ซึ่งเป็นการทดลองที่ไม่ใช้

ตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงให้เห็นว่าปริมาณผลได้เชิงพลังงานลดลงเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากพลังงานส่วนหนึ่งเปลี่ยนรูปกลายเป็นแก๊ส จากรูปที่ 2 และรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีแก๊สเป็นส่วนมาก [17] ซึ่งส่งผลต่อปริมาณผลได้เชิงพลังงานลดลงจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ได้ค่าความร้อนของไบโอออยล์ที่เพิ่มขึ้น [29, 30]

ตารางที่ 4 ปริมาณผลได้เชิงพลังงานจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละ)

ผลิตภัณฑ์	ตัวเร่งปฏิกิริยา โดโลไมต์ (องศาเซลเซียส)			ตัวเร่งปฏิกิริยา ดินขาวเคโอลิน (องศาเซลเซียส)		
	450	500	550	450	500	550
ไบโอออยล์	25.0	29.5	29.8	30.2	20.6	11.1
ถ่านชาร์	38.1	34.2	35.0	31.6	33.3	31.0
แก๊ส	36.9	36.3	35.2	38.2	46.1	57.9

ตารางที่ 5 แสดงสมบัติของไบโอออยล์ ได้แก่ ปริมาณน้ำ ค่าความหนืด ค่าความหนาแน่น จุดวาบไฟ และจุดติดไฟ เทียบกับมาตรฐาน ASTM D7544-12 โดยพบว่าปริมาณน้ำจากข้อกำหนดไม่เกินร้อยละ 30 [19] ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำของไบโอออยล์หนักในทุกอุณหภูมิผ่านเกณฑ์มาตรฐาน โดยปริมาณน้ำอยู่ในช่วงร้อยละ 6.9 ถึง 10.6 และมีปริมาณน้ำน้อยที่สุดเป็นร้อยละ 6.9 ที่อุณหภูมิเร่งปฏิกิริยา 550 องศาเซลเซียส ของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินมีค่าไม่แตกต่างกันมาก เมื่อเทียบกับการไพโรไลซิสแบบเร็วเมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าปริมาณของน้ำในไบโอออยล์เฟสหนักลดลงถึงร้อยละ 5 เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีสมบัติในการแยกออกซิเจนออกและมีผลต่อค่าความร้อนสูง

[11] จากตารางที่ 5 ค่าความหนืดจากการทดลองอุณหภูมิช่วง 450 500 และ 550 องศาเซลเซียส ค่าความหนืดเป็น 45.6 50.2 และ 59.3 เซนติสโตกส์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ และได้ค่าความหนืดเป็น 49.4 53.6 และ 56.2 ของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด ได้ค่าเป็น 59.3 และ 56.3 เซนติสโตกส์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลิน ซึ่งมีค่าแตกต่างกันไม่มาก แต่เมื่อเทียบกับการทดลองที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงตารางที่ 3 พบว่ามีค่าที่น้อยกว่าถึงประมาณ 20 เซนติสโตกส์ เหตุที่ความหนืดของไบโอออยล์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาก็เนื่องจากปริมาณน้ำในไบโอออยล์ที่ลดลง จากผลการทดลองใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถทำให้น้ำในไบโอออยล์เกิดการแยกชั้น ในขณะเดียวกันเมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไบโอออยล์ที่ผลิตได้จะมีการผสมของน้ำทำให้ค่าความหนืดน้อย แต่ผลการทดลองก็ผ่านเกณฑ์มาตรฐานตาม ASTM ที่กำหนดต่ำกว่า 125 เซนติสโตกส์ [25]

ความหนาแน่นของไบโอออยล์อยู่ในช่วง 1.1 ถึง 1.3 กรัมต่อมิลลิลิตรผลการทดลองพบว่าอยู่ในช่วงมาตรฐานเป็น 1.1 และ 1.3 กรัมต่อมิลลิลิตร และผลการทดลองแสดงค่าไม่แตกต่างเมื่อเทียบกับการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แต่อยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำ จุดวาบไฟเกณฑ์กำหนดไว้ที่มากกว่า 45 องศาเซลเซียส [25] ก็ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน ส่วนจุดติดไฟไม่ได้กำหนดในมาตรฐานแต่มีค่าสูงกว่าจุดวาบไฟเล็กน้อย และค่าความร้อนของไบโอออยล์อยู่ที่ประมาณ 20.2 และ 21.7 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งตรงกับงานวิจัยที่กล่าวว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีสมบัติต่อการแยกออกซิเจนออกจากไบโอออยล์ [11] จะส่งผลต่อค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งตรงกับผลการทดลองนี้ เมื่อเทียบกับการไพโรไลซิสแบบเร็วไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าความร้อน 18.0 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเพิ่มค่าความร้อนสูงของไบโอออยล์ถึง 4 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

ตารางที่ 5 สมบัติของไบโอออยล์จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

วิเคราะห์	ตัวเร่งปฏิกิริยาโพลีไมต์ (องศาเซลเซียส)			ตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลิน (องศาเซลเซียส)			ASTM D7544-12
	450	500	550	450	500	550	
	ปริมาณน้ำ (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	10.6±0.8	8.8±1.0	6.9±1.1	10.6±0.6	7.4±0.3	
ความหนืด (เซนติสโตกส์)	45.6±1.2	50.2±1.6	59.3±1.0	49.4±1.1	53.6±0.8	56.2±0.4	<125
ความหนาแน่น (กรัมต่อ มิลลิลิตร)	0.9±0.2	1.1±0.1	1.1±0.1	1.0±0.2	1.2±0.1	1.3±0.1	1.1-1.3
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	120±3.5	115±2.8	105±2.5	118±4.2	113±1.6	109±2.8	>45
จุดติดไฟ (องศาเซลเซียส)	129±3.2	128±3.6	118±2.9	132±3.1	125±2.7	122±2.9	-
ค่าความร้อนสูง (เมกะจูล ต่อกิโลกรัม)	19.3±0.8	20.2±0.4	20.2±0.8	21.3±0.3	20.4±0.5	21.7±0.8	>15

4. สรุปผลการทดลอง

การไฟโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟองของไบและยอตอ้อยเมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาให้ปริมาณผลได้เชิงมวลของไบโอออยล์สูงสุดร้อยละ 62 ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส โดยแบ่งเป็นไบโอออยล์หนักร้อยละ 42 และไบโอออยล์เบา ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ไบโอออยล์หนักมีสมบัติที่ได้ตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM D7544-12 ได้แก่ ปริมาณน้ำ ความหนืด ความหนาแน่น จุดวาบไฟ จุดติดไฟ และค่าความร้อน โดยเมื่อนำค่าความร้อนมาคำนวณหาปริมาณผลได้เชิงพลังงาน พบว่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ให้ปริมาณผลได้เชิงพลังงานสูงที่สุดถึงร้อยละ 47 โดยที่อุณหภูมินี้ถ่านชาร์มีปริมาณผลได้เชิงพลังงานร้อยละ 31 และแก๊สร้อยละ 22 เมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาค่าความร้อนของไบโอออยล์เป็น 18 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ขณะที่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพลีไมต์สามารถทำให้ค่าความร้อนของไบโอออยล์มีค่าเป็น 20 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินมีค่าความร้อนเป็น 22 เมกะจูลต่อกิโลกรัม แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด

สามารถช่วยเพิ่มค่าความร้อนของไบโอออยล์ได้ดีขึ้น แต่ปริมาณผลได้เชิงมวลของไบโอออยล์หนักและไบโอออยล์เบาลดลงถึงร้อยละ 20 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินให้ปริมาณผลได้เชิงพลังงานของไบโอออยล์มีค่าเป็นร้อยละ 30 ที่อุณหภูมิเร่งปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส ขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาโพลีไมต์ให้ปริมาณผลได้เชิงพลังงานประมาณร้อยละ 30 ที่อุณหภูมิเร่งปฏิกิริยา 500 ถึง 550 องศาเซลเซียส

ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโพลีไมต์และดินขาวเคโอลินมีข้อดีทำให้ค่าความร้อนของไบโอออยล์สูงขึ้น 4 ถึง 5 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ส่วนข้อเสียคือปริมาณผลได้เชิงมวลและเชิงพลังงานลดลง แต่จะขึ้นอยู่กับรูปของแก๊สที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงควรพิจารณานำแก๊สมาใช้ให้เกิดประโยชน์ทางพลังงานร่วมด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนการวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2558 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (กบง./2558-104)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Hemstock and D. Hall, "Biomass energy flows in Zimbabwe," *Biomass and Bioenergy*, vol. 8, pp. 151-173, 1995.
- [2] S. C. Bhattacharya, P. A. Salam, H. L. Pham, and N. H. Ravindranath, "Sustainable biomass production for energy in selected Asian countries," *Biomass and Bioenergy*, vol. 25, pp. 471-482, Nov. 2003.
- [3] N. Abdullah, H. Gerhauser, and F. Sulaiman, "Fast pyrolysis of empty fruit bunches," *Fuel*, vol. 89, pp. 2166-2169, Aug. 2010.
- [4] A. V. Bridgwater, D. Meier, and D. Radlein, "An overview of fast pyrolysis of biomass," *Organic Geochemistry*, vol. 30, pp. 1479-1493, Dec. 1999.
- [5] Q. Lu, W.-Z. Li, and X.-F. Zhu, "Overview of fuel properties of biomass fast pyrolysis oils," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, pp. 1376-1383, May 2009.
- [6] S. M. Lappas AA, Iatridis DK, Voutetakis SS, Vasalos IA, "Biomass pyrolysis in a circulating fluid bed reactor for the production of fuels and chemicals," *Fuel*, vol. 81, pp. 2087-2095, 2002.
- [7] A. Pattiya, S. Sukkasi, and V. Goodwin, "Fast pyrolysis of sugarcane and cassava residues in a free-fall reactor," *Energy*, vol. 44, pp. 1067-1077, Aug. 2012.
- [8] K. El harfi, A. Mokhlisse, M. B. Chanâa, and A. Outzourhit, "Pyrolysis of the Moroccan (Tarfaya) oil shales under microwave irradiation," *Fuel*, vol. 79, pp. 733-742, May 2000.
- [9] G. A. Das P, Wangikar P, "Influence of pretreatment of biomass on pyrolysis products," *Biomass and Bioenergy*, vol. 27, p. 445-457, 2004.
- [10] A. Pattiya and S. Suttibak, "Fast pyrolysis of sugarcane residues in a fluidised bed reactor with a hot vapour filter," *Journal of the Energy Institute*, 2015.
- [11] H. Zhang, R. Xiao, H. Huang, and G. Xiao, "Comparison of non-catalytic and catalytic fast pyrolysis of corncob in a fluidized bed reactor," *Bioresour Technol*, vol. 100, pp. 1428-34, Feb 2009.
- [12] J. Remón, J. Arauzo, L. García, P. Arcelus-Arriaga, M. Millan, I. Suelves, *et al.*, "Bio-oil upgrading in supercritical water using Ni-Co catalysts supported on carbon nanofibres," *Fuel Processing Technology*, vol. 154, pp. 178-187, Dec. 2016.
- [13] S. W. Kim, B. S. Koo, and D. H. Lee, "Catalytic pyrolysis of palm kernel shell waste in a fluidized bed," *Bioresource Technology*, vol. 167, pp. 425-432, Sept. 2014.
- [14] O. D. Mante, F. A. Agblevor, S. T. Oyama, and R. McClung, "Catalytic pyrolysis with ZSM-5 based additive as co-catalyst to Y-zeolite in two reactor configurations," *Fuel*, vol. 117, Part A, pp. 649-659, Jan. 2014.
- [15] K. L. Hew, A. M. Tamidi, S. Yusup, K. T. Lee, and M. M. Ahmad, "Catalytic cracking of bio-oil to organic liquid product (OLP)," *Bioresource Technology*, vol. 101, pp. 8855-8858, Nov. 2010.
- [16] K. P. Shadangi and K. Mohanty, "Production and characterization of pyrolytic oil by catalytic pyrolysis of Niger seed," *Fuel*, vol. 126, pp. 109-115, 2014.

- [17] S. Meesuk, J.-P. Cao, K. Sato, Y. Ogawa, and T. Takarada, "Fast Pyrolysis of Rice Husk in a Fluidized Bed: Effects of the Gas Atmosphere and Catalyst on Bio-oil with a Relatively Low Content of Oxygen," *Energy & Fuels*, vol. 25, pp. 4113-4121, 2011.
- [18] Sluiter. A, Hames. B, Ruiz. R, Scarlata. C, Sluiter. J, and Templeton. D, "Determination of Ash in Biomass," *National Renewable Energy Laboratory*, 2008.
- [19] A. Oasmaa and C. Peacocke, "Properties and Fuel Use of Biomass Derived Fast Pyrolysis Liquids," VTT Publications, 2010.
- [20] Q. M. K. Waheed, C. Wu, and P. T. Williams, "Pyrolysis/reforming of rice husks with a Ni-dolomite catalyst: Influence of process conditions on syngas and hydrogen yield," *Journal of the Energy Institute*, vol. 89, pp. 657-667, Nov. 2016.
- [21] J. M. Encinar, J. F. González, G. Martínez, and S. Román, "Catalytic pyrolysis of exhausted olive oil waste," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 85, pp. 197-203, 2009.
- [22] E. Mohiuddin, Y. M. Isa, M. M. Mdleleni, N. Sincadu, D. Key, and T. Tshabalala, "Synthesis of ZSM-5 from impure and beneficiated Grahamstown kaolin: Effect of kaolinite content, crystallisation temperatures and time," *Applied Clay Science*, vol. 119, Part 2, pp. 213-221, Jan. 2016.
- [23] E. Mohiuddin, Y. M. Isa, M. M. Mdleleni, and D. Key, "Effect of kaolin chemical reactivity on the formation of ZSM-5 and its physicochemical properties," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 237, pp. 1-11, Jan. 2017.
- [24] A. V. Bridgwater, "Biomass Fast Pyrolysis" *Thermal Science*, vol. 8, pp. 21-49, 2004.
- [25] A. Oasmaa, C. Peacocke, E. Leppämäki, P. Koponen, J. Levander, and E. Tapola, "Physical characterisation of biomass-based pyrolysis liquids Application of standard fuel oil analyses," 1997.
- [26] A. V. Bridgwater, "Principles and practice of biomass fast pyrolysis processes for liquids," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 51, pp. 3-22, Jul. 1999.
- [27] R. Xu, L. Ferrante, C. Briens, and F. Berruti, "Bio-oil production by flash pyrolysis of sugarcane residues and post treatments of the aqueous phase," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 91, pp. 263-272, May 2011.
- [28] S. Al Arni, B. Bosio, and E. Arato, "Syngas from sugarcane pyrolysis: An experimental study for fuel cell applications," *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 29-35, Jan. 2010.
- [29] O. D. Mante, F. A. Agblevor, and R. McClung, "Fluid catalytic cracking of biomass pyrolysis vapors," *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 1, pp. 189-201, 2011.
- [30] C. Myrén, C. Hörnell, E. Björnbom, and K. Sjöström, "Catalytic tar decomposition of biomass pyrolysis gas with a combination of dolomite and silica," *Biomass and Bioenergy*, vol. 23, pp. 217-227, Sept. 2002.